



遠方銀河観測の最前線と 次世代望遠鏡計画の展望

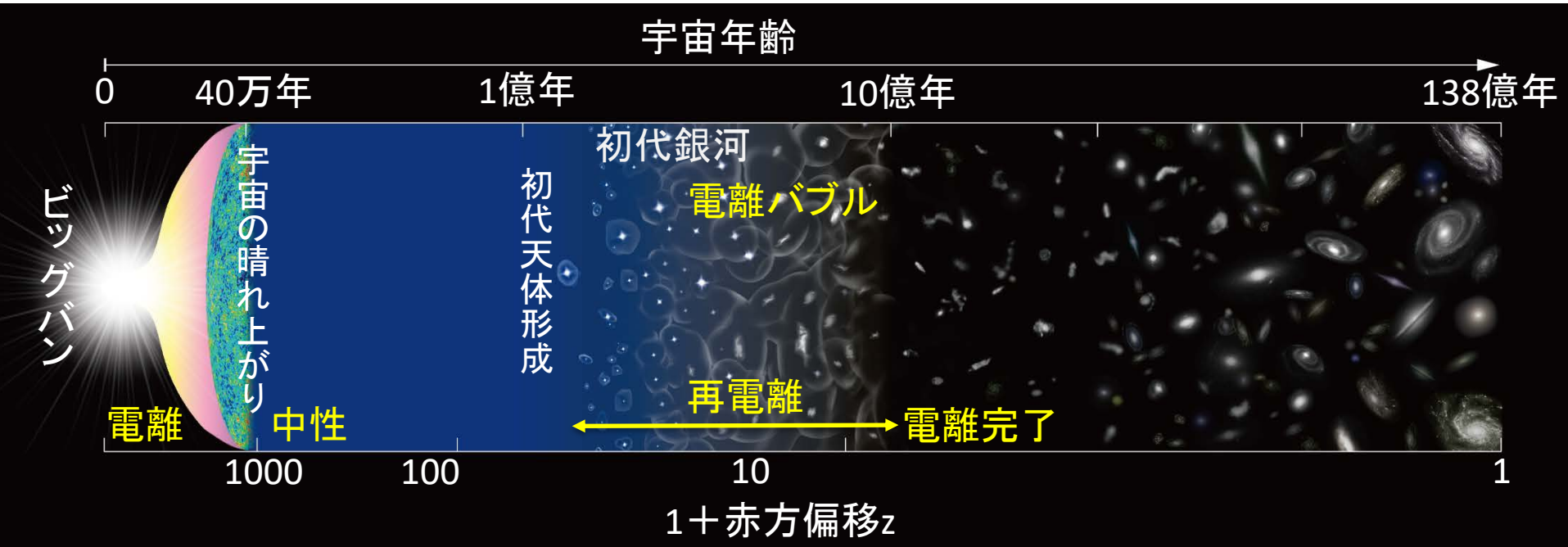
筑波大学宇宙史研究センター
テニュアトラック助教 (卓越研究員)

橋本 拓也

発表の内容

- **導入**
宇宙再電離時代の銀河の観測
遠方の銀河を観測するためには
- **最近の研究内容・成果**
- **今後の中期的な展望**
 - 次世代宇宙望遠鏡 JWST
 - 南極THz望遠鏡

宇宙再電離

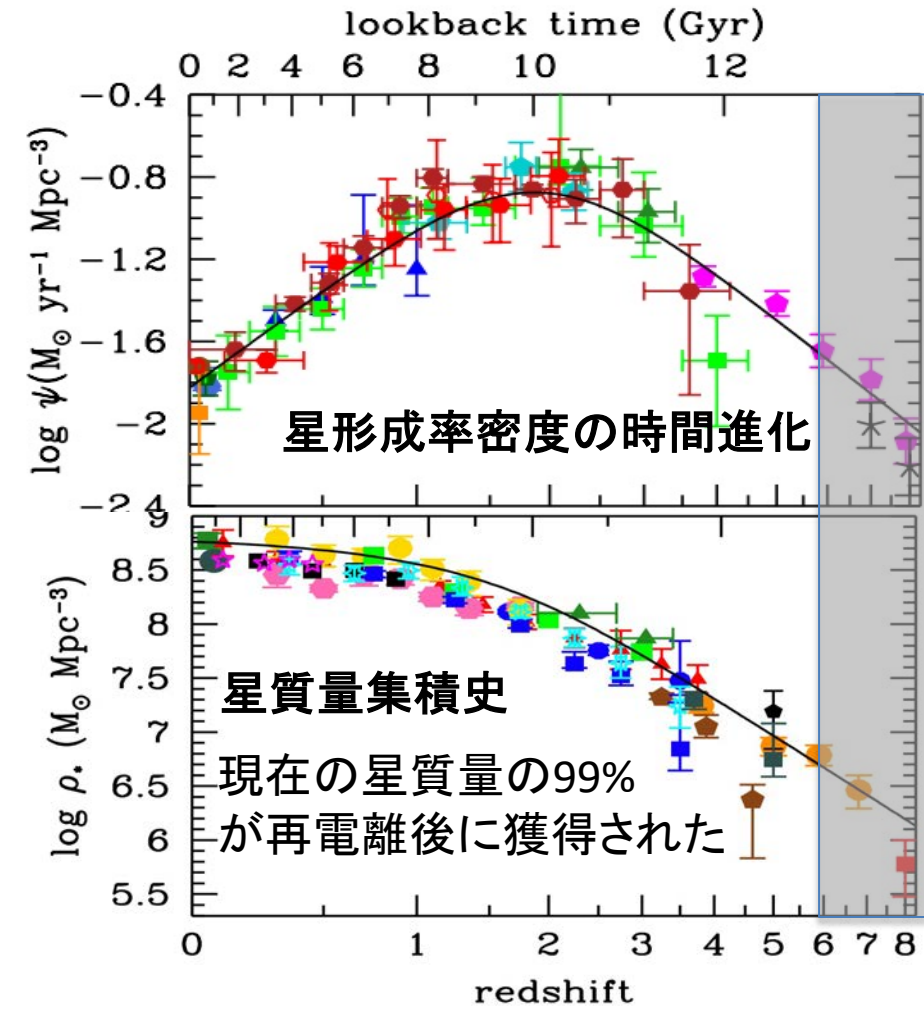
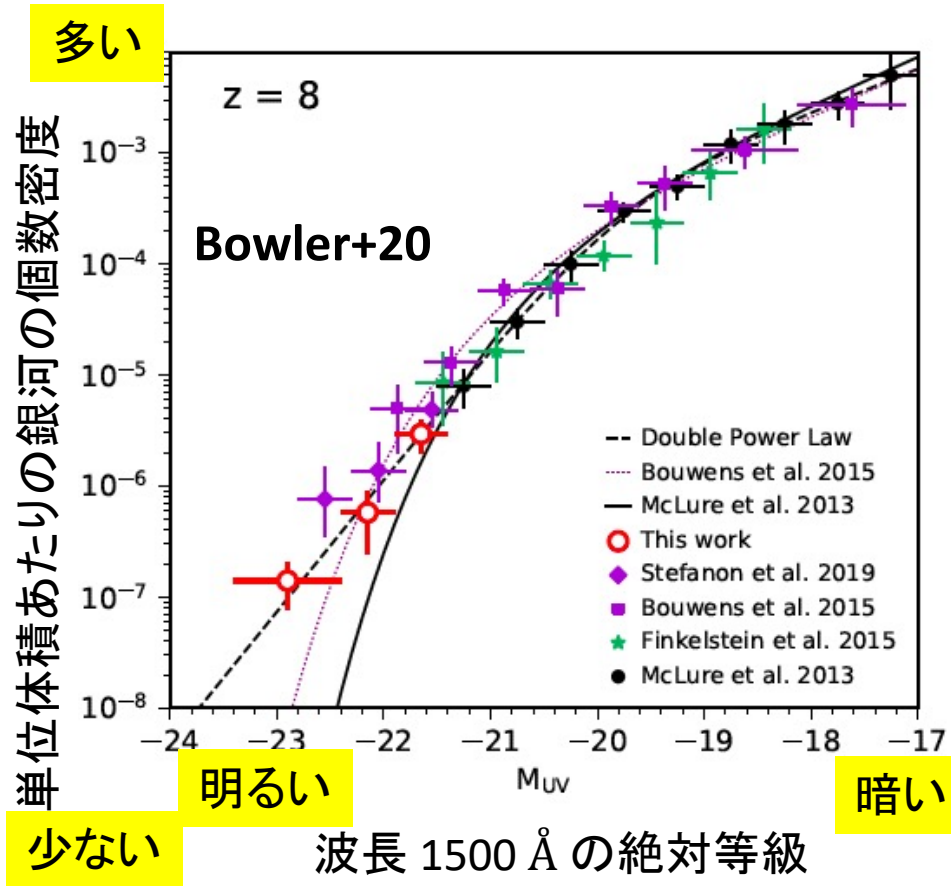


- 宇宙年齢~ 2 - 10 億年 (赤方偏移 $z=20 - 6$)に起きた相転移
 - 初代天体 (銀河) の電離光子 ($h\nu > 13.6 \text{ eV}$, $\lambda < 912 \text{ \AA}$)
 - 多様な元素や宇宙塵の起源: 宇宙で最初の酸素、炭素
- 重要な未解決問題
 - いつ、どのように、何が再電離を引き起こしたか？
 - ➔ 遠方すなわち過去の銀河観測が大切 ... ρ_{UV} , ξ_{ion} , $f_{\text{esc}}(\text{LyC})$

宇宙再電離時代の銀河を調べる意義

- 銀河進化: どのように現在の銀河宇宙の姿になったか?

銀河の紫外光度関数 (c.f.,人口統計)



- 遠方の超新星爆発、ひいては中性子星や中性子星連星のイベントレートへ知見

どのように遠方銀河を観測するか?

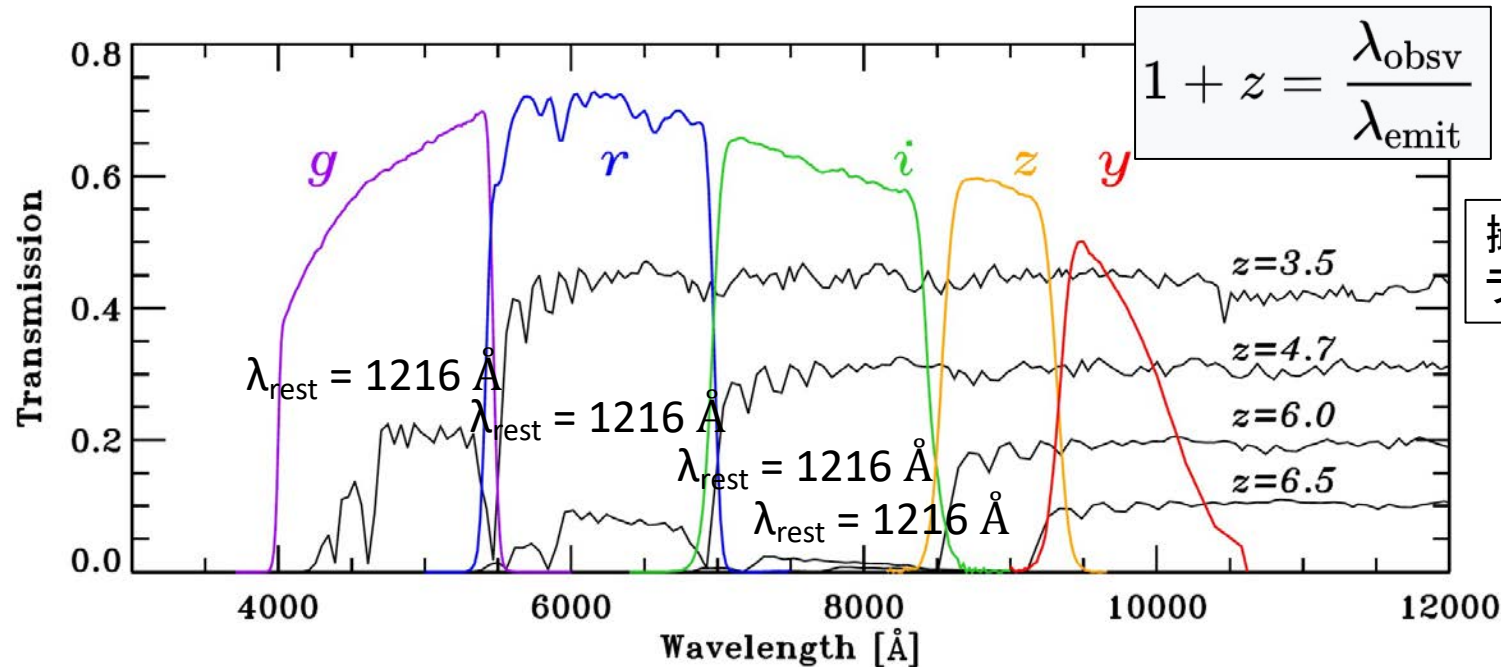
● 撮像観測

- 視野内にある銀河候補を効率良く探査
- 統計量を得る上で不可欠

● 分光観測

- 特定の原子/分子が放射する輝線
- 力学的な性質, 複数輝線から化学的な性質へ知見

● 両者は相補的だが, 遠方銀河の分光は極めて困難



撮像観測の例:
ライマンブレイク法

どのように遠方銀河を観測するか?

● 分光観測の例

● Hydrogen Ly α (1216 Å)

→ 従来使われてきた強輝線. 再電離「完了後」の銀河の観測が得意

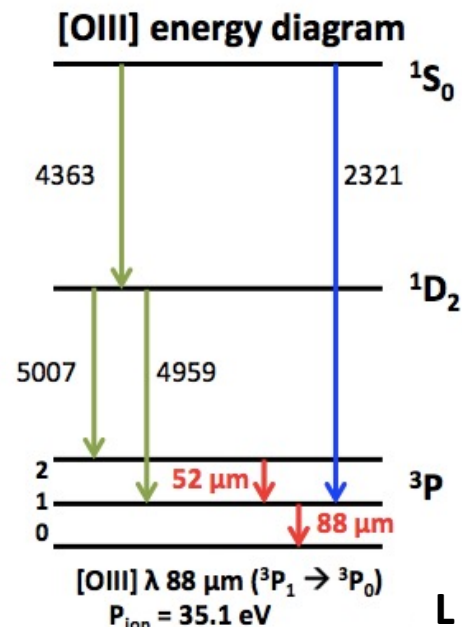
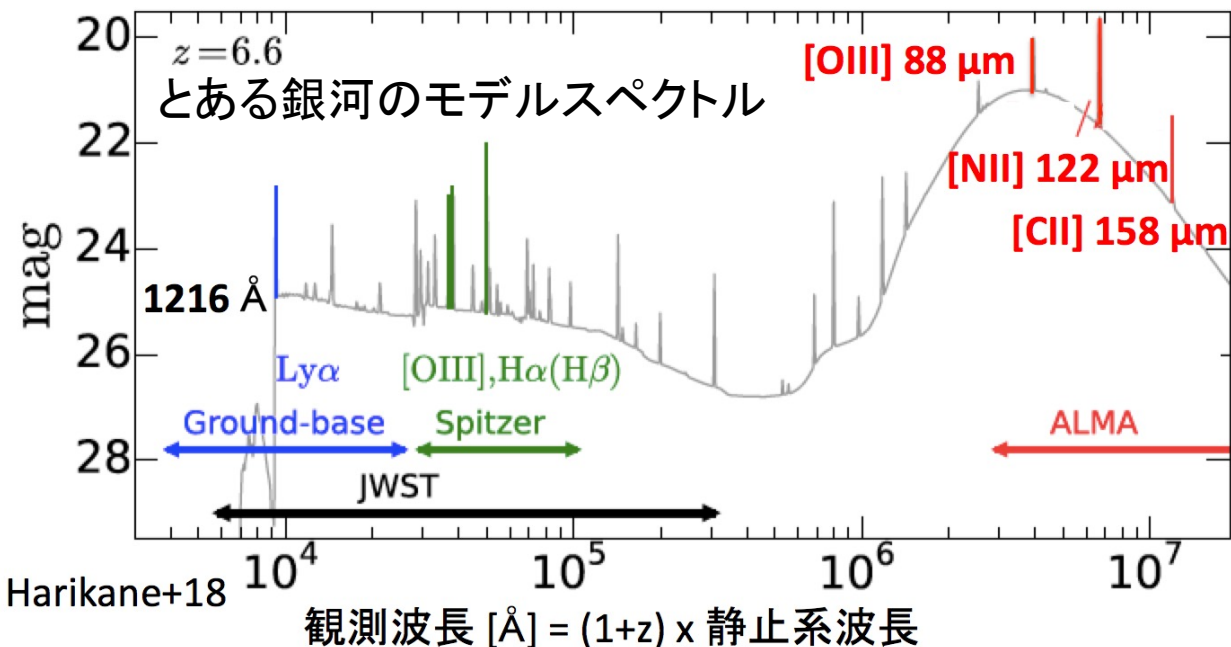
* 再電離期では銀河間空間を漂う中性ガスに散乱され弱い

● C⁺ 158 μ m (微細構造輝線, 励起 E = 11 eV)

→ 星間媒質の中性ガス領域. 再電離期で予想外に弱い

● O²⁺ 88 μ m (微細構造輝線, 励起 E = 35 eV)

→ 星間媒質の電離ガス領域. 我々が独自に推進する新しい「窓」



L・S結合

O²⁺ 88 μm (微細構造輝線, 励起 E = 35 eV)

→ 星間媒質の電離ガス領域. 我々が独自に推進する新しい「窓」

- R3 文部科学大臣表彰 若手科学者賞「電離酸素の輝線を用いた様々な最遠方銀河の観測」
- R3 筑波大若手教員 特別奨励賞

- 2021年7月
日本天文学会 欧文論文報告 (PASJ)
インパクトファクター 2.24 (2019) → 5.07 (2021)
高被引用数論文5編へ選出 (113件)



Big Three Dragons: A $z = 7.15$ Lyman-break galaxy detected in [O III] 88 μm, [C II] 158 μm, and dust continuum with ALMA

Takuya Hashimoto et al. ¹ “Big Three Dragons” is a hand in a *Mahjong* game with triplets or quads of all three dragons.

- 2021年5月
NHK BS「コズミックフロント」すばる20周年ALMA10周年番組に出演



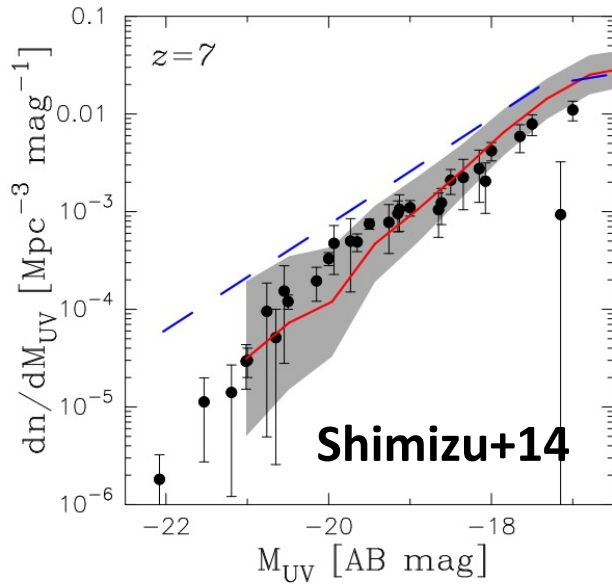
ALMA

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

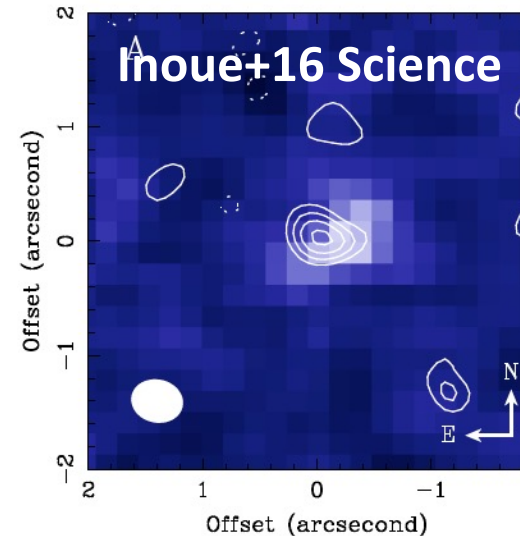
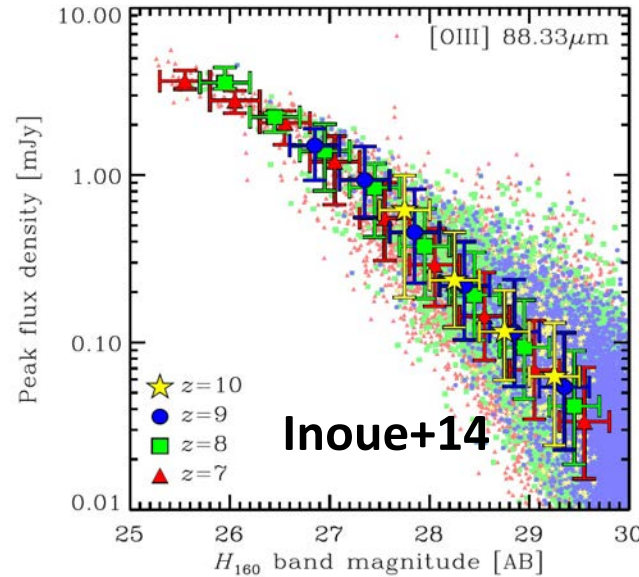
- アタカマ ミリ波サブミリ波 大型干渉計
- 66 台のアンテナが巨大な 1 基の望遠鏡のように振る舞う
- 南米チリ アタカマ高原 (標高 5,000 m) にあり、当該波長で最高感度



新しい遠方銀河探査ツールとしての[OIII]



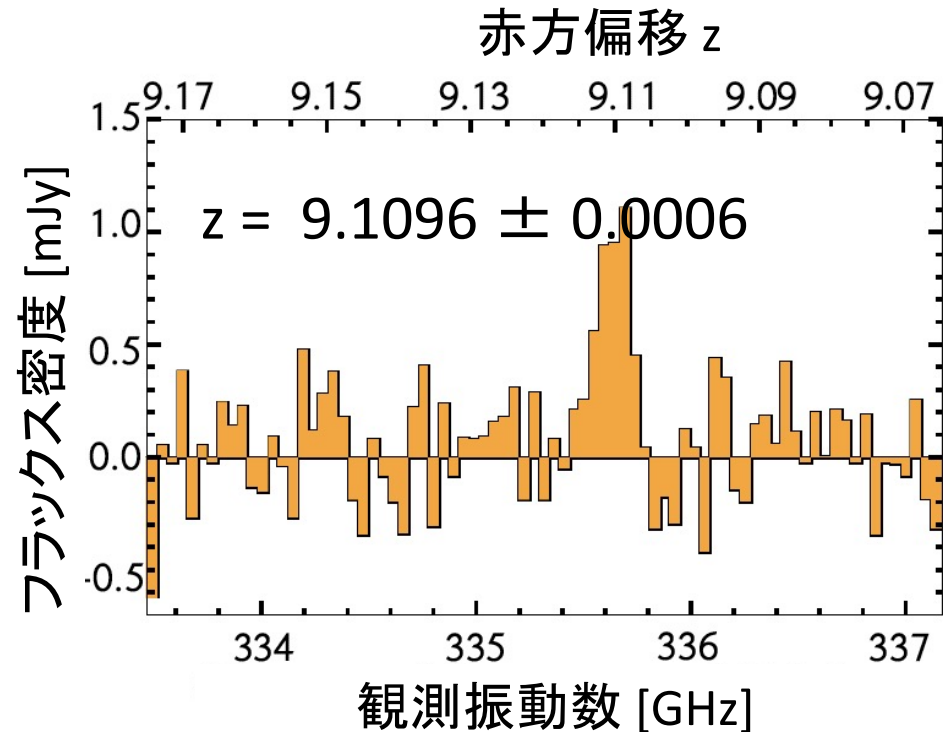
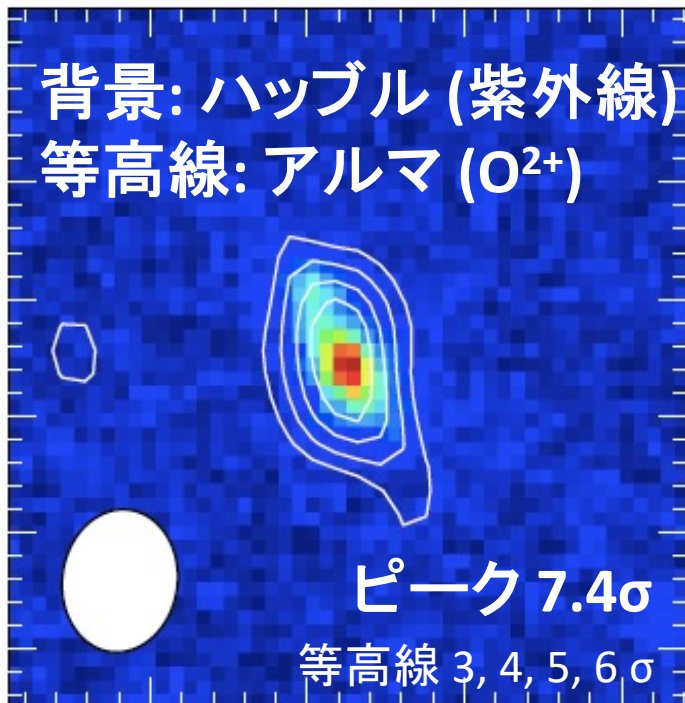
prediction of [OIII] flux



- Shimizu+14 のシミュレーション (観測データを再現)
- 星雲輝線モデル “CLOUDY” に基付いた z -依存する [OIII] 放射率
- 2014 年に理論予想: $z > 8$ の明るい銀河は早く重元素汚染 ($0.2 Z_{\odot}$) するため、ALMA で [OIII] 88 μm を検出できるはず
- Inoue et al. 2016, *Science*

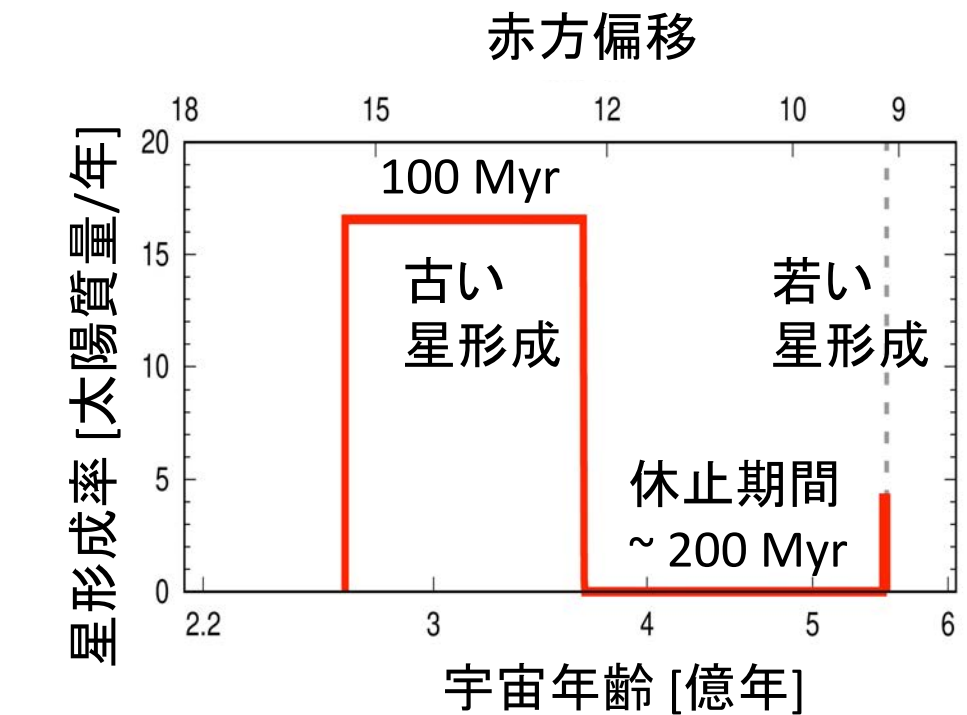
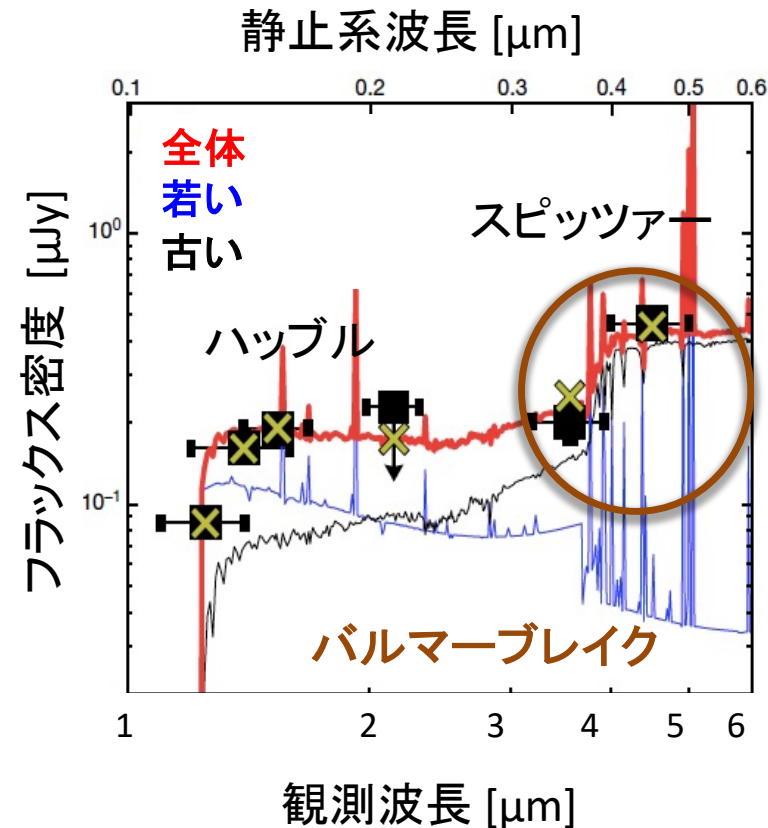
アルマで最遠方銀河記録の樹立

- Hashimoto, Laporte, Mawatari et al. 2018 Nature
- ハッブル宇宙望遠鏡で発見された赤方偏移の未定天体
- ライマンブレイクによる測光赤方偏移 $z = 9.0 - 9.8$



宇宙最初期の星形成へ知見

- Hashimoto, Laporte, Mawatari et al. 2018 Nature
- 正確な距離 (赤方偏移) → 波長 $4.5 \mu\text{m}$ 帯に**バルマーブレイク**
年齢 1 億年以上の恒星種族が主な成分
- 星形成の開始時期は赤方偏移 15 (宇宙年齢 2.5 億年)



300 Myr 遡る



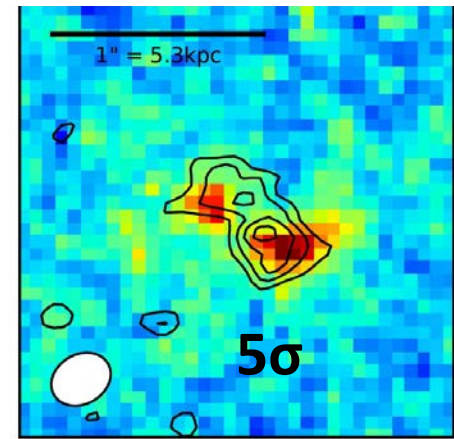
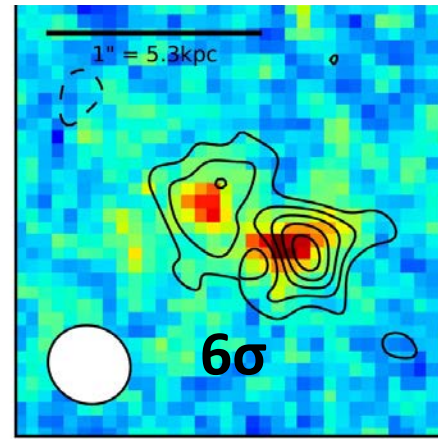
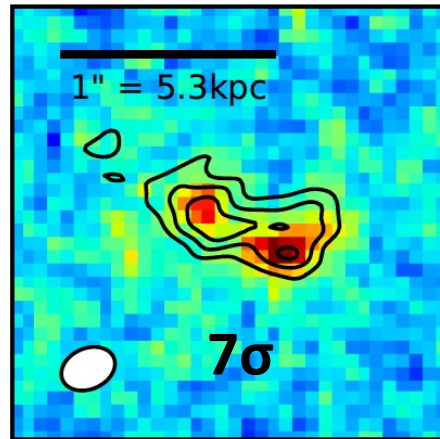
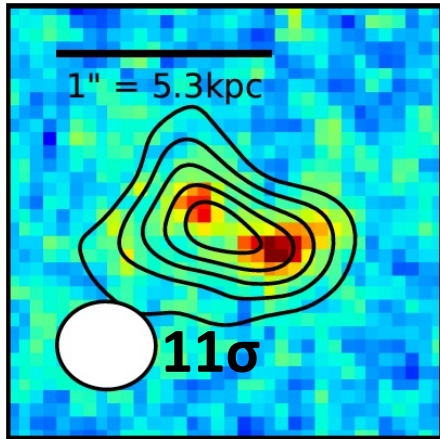
宇宙再電離期の銀河の星間媒質の扉を開く

[OIII] 88 μm

[CII] 158 μm

Dust @ 90 μm

160 μm

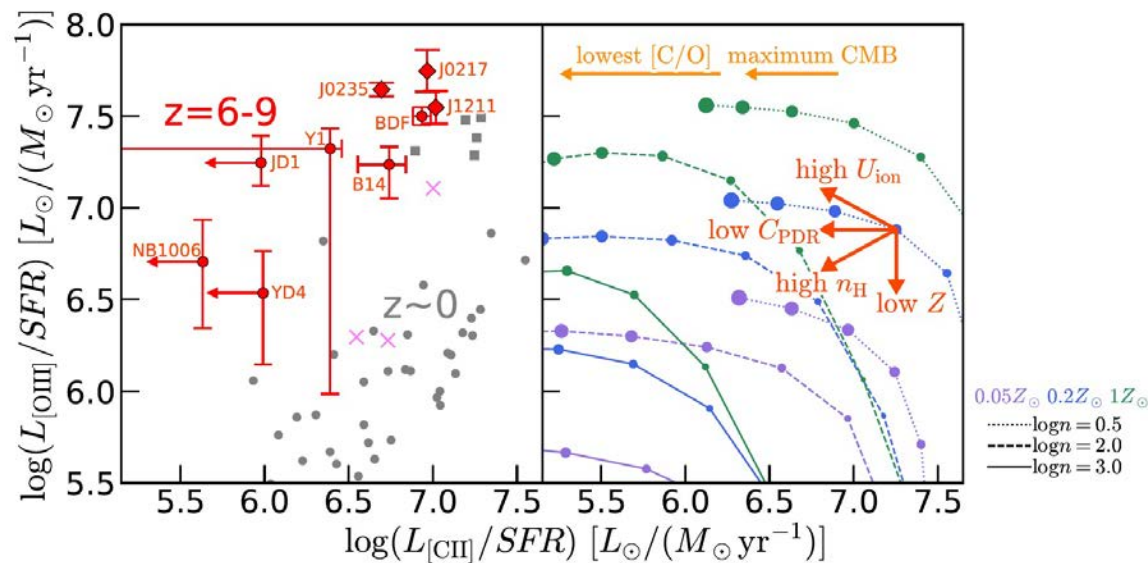
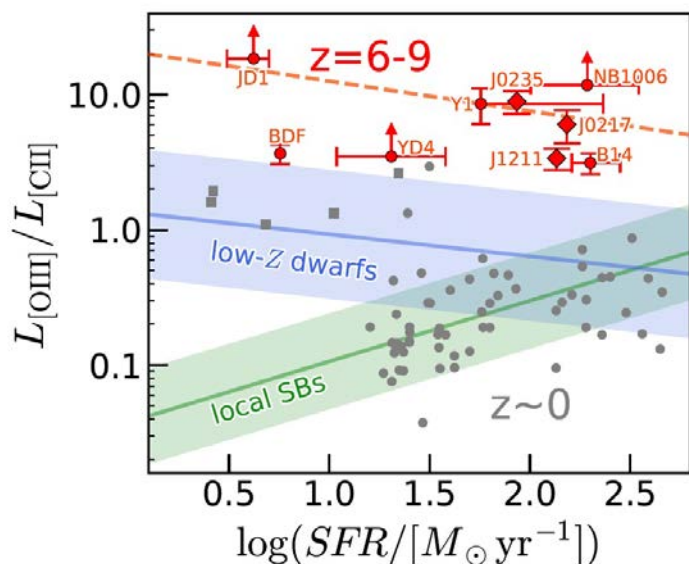


- 再電離期で初めて[OIII], [CII], ダスト3種の検出に成功 → 大三元
- [OIII] (若い大質量星に由来) が [CII] に比べ3倍も明るい
- 宇宙初期 (7.5億年) にもかかわらず、大量のダスト $M_{\text{dust}} \approx 1 \times 10^7 M_{\odot}$
- 超新星1イベントあたりのダスト産出量が高い $0.8 M_{\odot}$

新しい課題:初期宇宙になぜ大量のダストがあるのか？

ダスト(個体微粒子)は超新星や低質量星の終末期に放出された重元素が凝縮し形成し、重元素の降着による成長、超新星の逆光衝撃波により破壊される。

宇宙再電離期の銀河の星間媒質の扉を開く



Harikane incl. TH+20

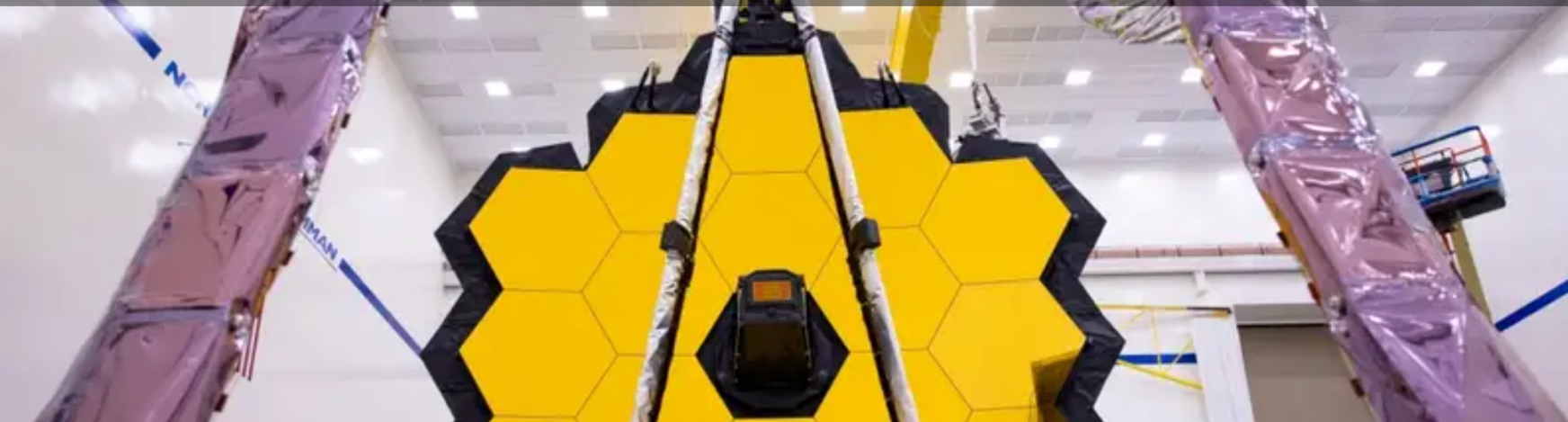
- 遠方銀河は普遍的に $[\text{OIII}] 88 / [\text{CII}] 158$ 光度比が高い
- 詳細な輝線モデリング
 - 近傍銀河に対して電離パラメータが 10-100 倍 / 中性ガス被覆率が低い C_{PDR} ($0 \sim 0.1$)
 - 高い O/C 組成比, 高いガス密度, CMB による $[\text{CII}]$ の減衰も可能
- 仮説の切り分けに、将来さらなる多輝線観測が必要
 - 前者の仮説 → 宇宙初期の銀河が再電離を引き起こしやすい状況

未発表の内容を含むため、非公開です。

未発表の内容を含むため、非公開です。

The James Webb Space Telescope (JWST)

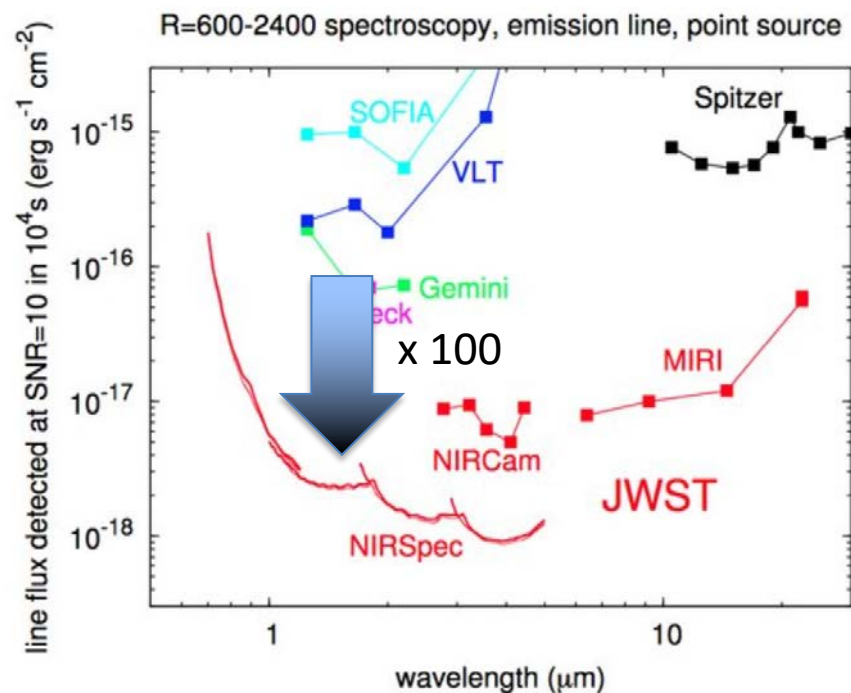
NASA's planned successor to the Hubble Space Telescope



NASA
開発費
\$10 billion ~ 1兆円

- 口径 6.25 メートル (cf., Hubble = 2.4 メートル)
- 可視光から中間赤外域で圧倒的な感度
- ゴールの一つが初代天体の観測

2021年12月23日に打ち上げを予定!



未発表の内容を含むため、非公開です。

未発表の内容を含むため、非公開です。

未発表の内容を含むため、非公開です。

未発表の内容を含むため、非公開です。

南極THz 望遠鏡計画への貢献(12m)

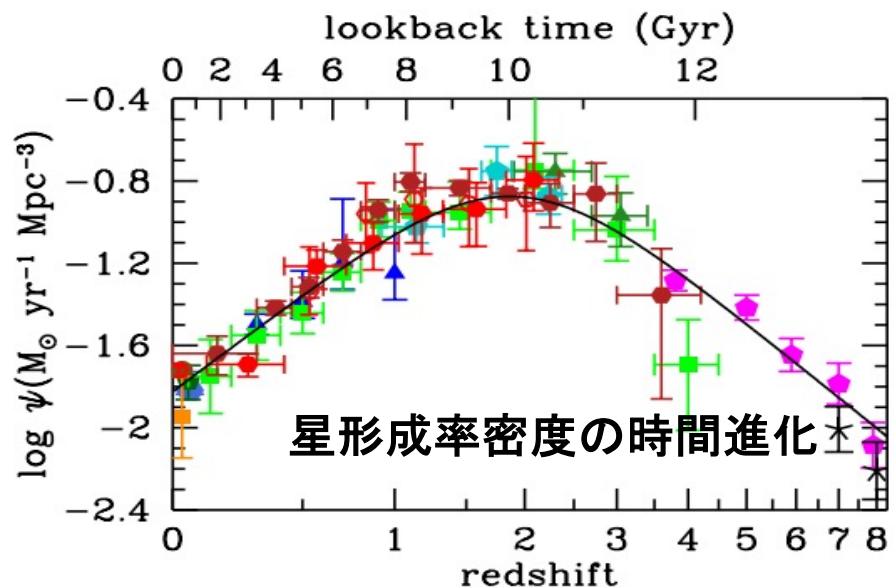


表 2: ATT12 の分光観測で得られる物理量

物理量	必要な輝線	対象となる赤方偏移	赤外光度の下限 $\log(LIR/L_0)$
電子密度	[OIII]52/88 または [NII]122/205	~0.7 – 6.0 ↓ (具体的には 0.7, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, ~6.0)	13.4 または 13.0
重元素量 (金属量)	[NIII]57, [OIII]52/88 または [CII]158, [NII]205	~0.4 – 6.0 (具体的には 0.4, 0.9, 3.0, 4.0, 5.0, ~6.0)	14.0 または 13.0
電離状態	[OIII]88, [CII]158 または [OIII]88, [OI]145	~1.2 – 6.0 ↓ (具体的には 1.2, 3.2, ~6.0)	12.8 または 13.0
AGN 診断	High-J CO (e.g., $J_{up}=12$)	0.4-0.8 および 2-5.6	~14

(注) 物理量を調べるために必要な赤外光度は大きいですが、連続波観測の項で述べたように、赤方偏移あたり少なくとも 1000 個のサンプルが期待されるため問題はない。

- 南極 THz 望遠鏡のサイエンス検討会の主催 (宇宙理論との合同)
- 遠方銀河の輝線観測のサイエンス検討

多色カメラ → 近傍宇宙から赤方偏移 5 程度の各時代で 100 万 – 1,000 万天体

分光 → ダストに覆われた銀河の星間媒質の研究

→ ATT12 で初めてダストに覆われた銀河の星間媒質を統計調査できる

未発表の内容を含むため、非公開です。